

КОНТАКТЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ С БАРЬЕРНЫМИ СЛОЯМИ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА

© Е. П. Корчагин¹, Ю. И. Штерн¹, И. Н. Петухов¹, Д. Г. Громов¹,
М. Ю. Штерн¹, М. С. Рогачев¹, Р. М. Рязанов²

¹ Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

² Научно-производственный комплекс «Технологический центр»,
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1
E-mail: eg.ad2013@yandex.ru

Поступила в Редакцию 22 февраля 2024 г.

После доработки 26 апреля 2024 г.

Принята к публикации 16 мая 2024 г.

Предложен способ получения контактов на основе W–Ni и W–Co, выполняющих функции диффузионно-барьерных слоев в конструкции термоэлементов. Контакты сформированы электрохимическим осаждением пленок W–Ni и W–Co на образцах наноструктурированных термоэлектрических материалов на основе $Bi_2Te_{2.4}Se_{0.6}$, $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$, GeTe и PbTe, используемых для изготовления термоэлементов. Получены пленки толщиной до 15 мкм с разбросом по толщине не более 5%. Содержание вольфрама в составе пленок W–Ni составило 33.5 мас%, в пленках W–Co — 29.7 мас%. Удельное сопротивление и удельное контактное сопротивление пленок составило $3.4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м и $3.8 \cdot 10^{-9}$ Ом·м² соответственно. Адгезионная прочность пленок составляет 10–13 МПа. Установлено, что контакты, сформированные на образцах термоэлектрических материалов электрохимическим осаждением пленок на основе W–Co, могут быть использованы в конструкции термоэлементов с рабочими температурами до 900 К.

Ключевые слова: контакты; тугоплавкие металлы; термоэлемент; электрохимическое осаждение; сплав металлов; адгезия; удельное сопротивление; диффузионно-барьерные слои

DOI: 10.31857/S0044461824010067; EDN: NYRSNN

Сдерживающим фактором широкого применения термоэлектрических генераторов является их низкий коэффициент полезного действия, определяемый в основном эффективностью термоэлементов. Эффективность может быть увеличена за счет повышения термоэлектрической добротности термоэлектрических материалов, из которых изготавливаются термоэлементы [1, 2]. Также для увеличения коэффициента полезного действия может быть увеличена разность температур между горячими и холодными спаями термоэлементов, что повлечет за собой расширение интервала их рабочих температур.

В настоящее время разработаны термоэлектрические материалы, которые могут быть использованы для создания термоэлементов с рабочими температурами 200–1200 К [3, 4]. Следует, однако, отметить,

что для всех термоэлектрических материалов добротность имеет существенную температурную зависимость с наличием достаточно резкого максимума при определенных температурах. Таким образом, максимальные значения добротности термоэлектрических материалов наблюдаются в узком интервале температур. В связи с этим для создания эффективных термоэлементов, работающих в широком интервале температур, необходимо использовать несколько различных термоэлектрических материалов. Реализовать это можно с помощью создания многосекционных ветвей в термоэлементах. Каждая секция работает в определенном интервале температур и изготавливается из термоэлектрических материалов, имеющих максимальную добротность в этом интервале температур [5, 6].

Важной задачей при изготовлении эффективных многосекционных термоэлементов является обеспечение высококачественной коммутации секций в ветвях термоэлементов с помощью контактных систем. Структура контактных систем должна обеспечивать высокую адгезию и омический контакт с термоэлектрическим материалом, а также устранять взаимную диффузию материалов контакта и соединяемых термоэлектрических материалов при повышенных температурах, что определяет барьерные свойства контакта [7–9].

В термоэлементах с рабочими температурами до 500 К контактная система может представлять собой однослойную структуру. В качестве контактного и одновременно барьерного слоя используется Ni, пленки которого получают вакуумным напылением [7, 8]. Однако проведенные нами исследования показали, что при температурах выше 580 К никелевые контакты перестают выполнять функции диффузионно-барьерных слоев, в этом случае необходимо использовать многослойные контактные системы [7].

Для реализации основных способов соединения ветвей с коммутирующей шиной и секций в многосекционном термоэлементе, например, пайкой или с помощью эвтектических сплавов при высоких температурах требуется повышенная толщина пленочного контакта. Как показали эксперименты, для предотвращения разрушения материала контакта в процессе коммутации его толщина должна быть больше 5 мкм [9]. Удельное сопротивление контактов должно быть не больше сопротивления материалов, используемых для коммутации в структуре термоэлемента, как правило, эта величина составляет $\sim 10^{-7}$ Ом·м.

Использование толсто пленочных контактов позволяет также увеличить барьерные свойства, определяющие способность контактов устранять взаимную диффузию материала контакта и соединяемых термоэлектрических материалов при повышенных температурах [9]. Эффективным способом формирования толсто пленочных контактов является электрохимическое осаждение металлов и их сплавов. Электрохимическое осаждение чистых пленок W возможно только из высокотемпературных солевых расплавов, например на основе NaCl и KCl, при температурах 1200–1500 К.* Однако такие температуры не позволяют использовать данный способ при формировании диффузионно-барьерных слоев на образцах термоэлектрических материалов на основе $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$, $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$, GeTe и PbTe, которые явля-

ются наиболее эффективными в интервале температур до 900 К [5].

При электрохимическом осаждении из электролитов с органическими растворителями, например, на основе формамида и диметилсульфоксида образуются толстые пленки W с существенным содержанием оксидных соединений [10], характеризующиеся высоким электрическим сопротивлением, что неприемлемо для контактов. Решением указанной проблемы является электрохимическое осаждение слоев, содержащих кроме тугоплавких металлов, в нашем случае W, другие металлы, например Ni или Co [11]. Использование W при изготовлении контактов определяется его низким удельным сопротивлением ($5.5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Кроме того, W имеет высокий атомный вес и низкий коэффициент диффузии $10\text{--}12 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Эти параметры определяют его использование в качестве материала диффузионно-барьерных слоев в структуре контактов.

Цель работы — получение и исследование контактов, формируемых электрохимическим осаждением сплавов W на образцы термоэлектрических материалов.

Экспериментальная часть

Контакты формировали на образцах наноструктурированных твердых растворов $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ (0.14 мас% PbCl_2 и 1.80 мас% Te), $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ (0.16 мас% CuBr), GeTe (7.2 мас% Bi) и PbTe (0.3 мас% PbI_2 и 0.3 мас% Ni), полученных в [5] искровым плазменным спеканием нанодисперсных порошков этих материалов. Указанные твердые растворы имеют высокую термоэлектрическую добротность, $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ и $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ используются для изготовления ветвей термоэлементов с рабочими температурами до 600 К, а GeTe и PbTe — до 900 К [5, 12].

Существенное влияние на качество контактов оказывает состояние поверхности образцов термоэлектрических материалов [8, 9]. В связи с этим подготовке поверхности образцов в данной работе уделялось повышенное внимание. После механической безабразивной обработки поверхности образцов, перед электрохимическим осаждением, проводили ее декапирование в течение 3 мин в одном из растворов, содержащих 20% HNO_3 (х.ч., Merck KGaA), 30% NaOH (ч.д.а., AppliChem GmbH) или 30% CH_3COOH (х.ч., Clearsynth labs LTD).

Электрохимическое осаждение пленок проводили в электролитах, состав которых представлен в табл. 1. Осаждение W–Ni из электролита № 1 проводили при pH 8.5, температуре 363 К, токе $20 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$, в течение

* Ажогин Ф. Ф. Гальванотехника. Справочник. М.: Металлургия, 1987. С. 314–317.

Таблица 1

Составы растворов электролитов, использованных для электрохимического осаждения пленок сплавов W–Ni и W–Co

Компонент	Производитель	Электролит № 1	Электролит № 2
NiSO ₄ ·7H ₂ O (ч.)	Honeywell International Inc.	13 г·л ⁻¹	—
CoSO ₄ ·7H ₂ O (ч.)	Acros Organics B.V.B.A.	—	10 г·л ⁻¹
Na ₂ WO ₄ (ч.)	Cleartsynth labs LTD	68 г·л ⁻¹	60 г·л ⁻¹
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ (ч.д.а.)	Cleartsynth labs LTD	200 г·л ⁻¹	—
NH ₄ Cl (ос.ч.)	Cleartsynth labs LTD	50 г·л ⁻¹	—
(NH ₄) ₂ SO ₄ (ч.)	Acros Organics B.V.B.A.	—	250 г·л ⁻¹
NH ₄ OH (ч.), 25%	ООО «АЛЬДОСА»	—	120 мл·л ⁻¹
NaOH (ч.д.а.)	AppliChem GmbH	—	18 г·л ⁻¹

Примечание. «—» — отсутствие компонента.

30 мин. Режим осаждения W–Co из электролита № 2: pH 12–14, температура 328 К, ток 8–12 А·дм⁻², время 30 мин.

Исследование элементного состава пленок проводили на растровом электронном микроскопе JSM 6010 PLUS/LA (JEOL), снабженном приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA ENERGY Dry Cool (Oxford Instruments). Перед исследованием поверхности пленок образцы термоэлектрических материалов со сформированными пленками промывали в ацетоне (х.ч., ООО ТД «ХИММЕД») с последующей сушкой в потоке N₂ (ос.ч., ООО «Фирма «ХОРСТ»). После чего образцы помещали в рабочую камеру микроскопа. Исследование образцов проводили в вакууме, при давлении менее 10⁻⁴ Па. Изображение поверхности пленки получали с помощью детектора вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для определения толщины пленок на образцах формировали скол и проводили исследование боковой поверхности с помощью растрового электронного микроскопа.

Измерение адгезионной прочности пленок проводили с помощью метода прямого отрыва на установке Force Gauge PCE-FM50 (PCE Instruments). С целью оптимизации процесса измерения с помощью фотолитографии на пленке формировали контактные площадки размером 1 мм². Адгезионную прочность определяли в значениях усилия отрыва на единицу площади (Па). Погрешность измерения адгезионной прочности не превышала 5%.

Определение удельного электрического сопротивления сформированных электрохимическим осаждением пленок проводили следующим образом. Измеряли поверхностное сопротивление пленок четырехзондовым методом на установке RM3000

(Jandel) с относительной погрешностью 0.3%. Затем определяли удельное сопротивление по формуле

$$\rho = R_s h, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление, R_s — поверхностное сопротивление, h — толщина пленки.

Толщину пленки измеряли на контактном профилометре Tencor P-7 (KLA Instruments). Для этой цели с помощью фотолитографии на пленке формировали ступеньку. Толщину пленки определяли с погрешностью, не превышающей 10%.

Для определения удельного контактного сопротивления пленок, сформированных на образцах термоэлектрических материалов, использовали методику и измерительный стенд, разработанные авторами [13]. Методика позволяет проводить измерение контактного сопротивления с разрешением 10⁻¹⁰ Ом·м².

Исследование диффузионно-барьерных свойств пленок W–Co, сформированных на образцах Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te₃, проводили после их отжига при температуре 600 К. Пленки W–Co, сформированные на образцах GeTe, отжигали при температуре 900 К.

Для определения барьерных свойств на пленки W–Co, сформированные на образцах Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te₃, наносили оловянный припой с использованием слабоактивного флюса [3% NH₄Cl ос.ч. (Cleartsynth labs LTD) в глицерине х.ч. (AppliChem GmbH)]. Данную структуру отжигали в термокамере в течение 5 ч при температуре 600 К.

Обсуждение результатов

Морфология поверхности и структура пленок W–Ni и W–Co, сформированных на образцах термо-

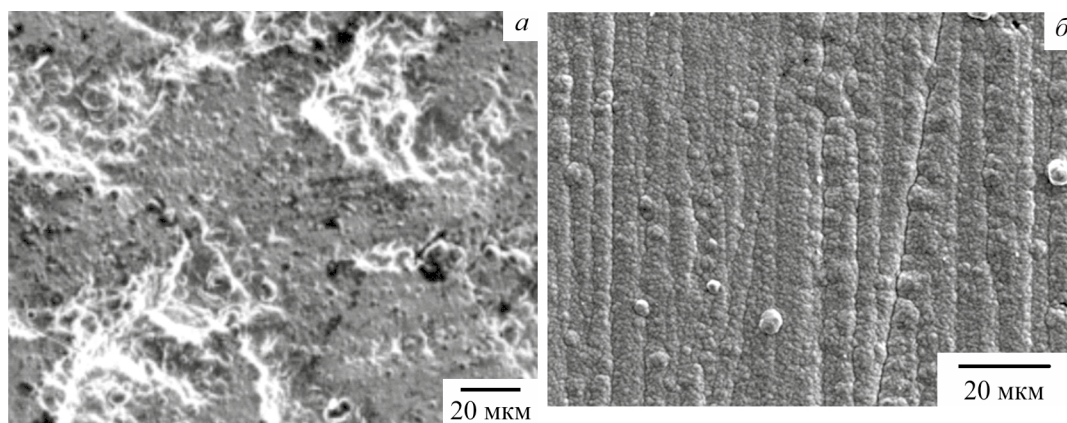


Рис. 1. Изображение поверхности пленок W–Ni (а) и W–Co (б), полученных на образцах GeTe.

электрических материалов $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, GeTe и PbTe, была сходной. Поэтому далее, как пример, представлены пленки W–Ni и W–Co, сформированные на некоторых из указанных термоэлектрических материалов. На рис. 1 представлено изображение поверхности пленок W–Ni и W–Co, полученных на образцах GeTe.

Значения толщины пленок W–Ni и W–Co практически не различались по поверхности всего образца, разброс по толщине не превышал 10%.

При исследованиях скола образцов GeTe со сформированной пленкой W–Ni толщиной 1.5 мкм в пленке обнаружены поры. Наличие пор в пленке W–Ni не позволяет использовать ее в качестве диффузионно-барьерного слоя в структуре контактной системы, так как через поры происходит взаимная диффузия компонентов термоэлектрического материала на поверхность пленки W–Ni и компонентов материала

коммутационного слоя, формируемого впоследствии на пленке W–Ni, например Sn, в термоэлектрический материал. Взаимная диффузия компонентов приводит в первом случае к увеличению электрического сопротивления контакта, во втором — к изменению параметров термоэлектрического материала.

В пленках W–Co пор не обнаружено, что позволяет использовать эти пленки в качестве диффузионно-барьерного слоя в структуре контакта. В связи с этим адгезионную прочность, удельное контактное сопротивление и барьерные свойства исследовали только пленок W–Co.

В результате энергодисперсионного анализа элементного состава пленок W–Ni и W–Co, полученных на образцах термоэлектрических материалов на основе GeTe (рис. 2, табл. 2), установлено наличие большего количества углерода в пленке W–Ni. Это связано с использованием цитратного лиганда для

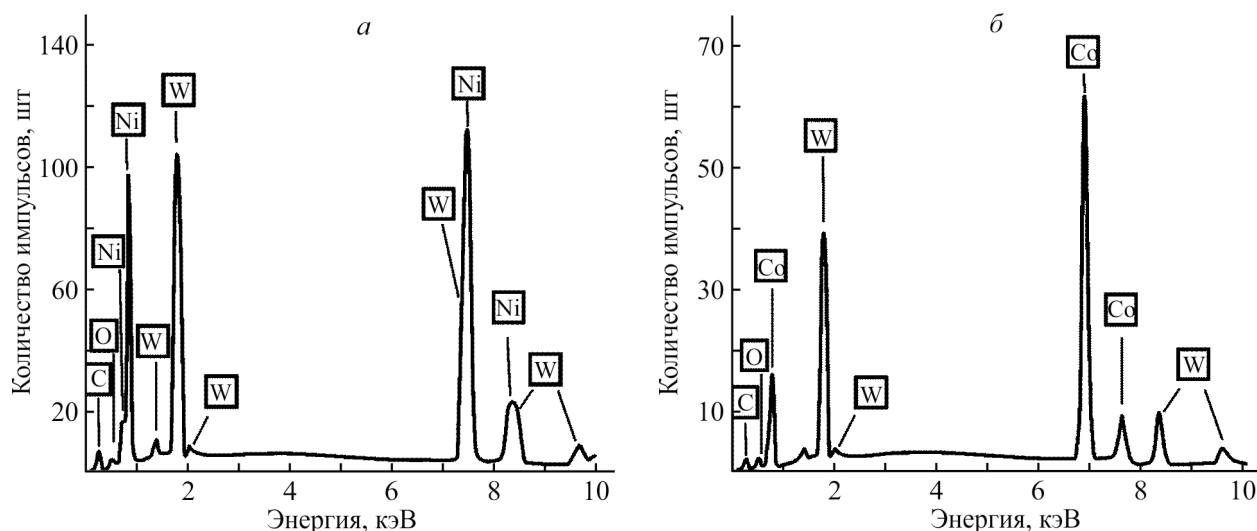


Рис. 2. Энергодисперсионная диаграмма состава пленок сплавов W–Ni (а) и W–Co (б), полученных на образцах GeTe.

Таблица 2
Элементный состав пленок, полученных на образцах GeTe

W–Ni			W–Co		
элемент	мас%	ат%	элемент	мас%	ат%
C	4.7	23.9	C	1.5	8.3
Ni	61.8	64.9	Co	68.1	77.9
W	33.5	11.2	W	29.7	10.9
—	—	—	O	0.7	2.9

Примечание. «—» — отсутствие компонента.

осаждения W–Ni, который попадал в поры, содержащиеся в пленке W–Ni, что затрудняло его удаление при промывании образцов. При получении пленок W–Co такой проблемы не было, так как цитратный лиганд при их осаждении не использовался. Кроме того, в этой пленке не было пор, что позволяло проводить эффективную очистку образцов.

Толщина пленки W–Co составила 15.2 мкм (рис. 3) после электрохимического осаждения в течение 30 мин. На пленке W–Co сформирован слой Sn толщиной порядка 35 мкм.

В результате исследований с использованием поэлементного картирования скола образца термоэлектрического материала $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ (рис. 4) установлено, что после термической обработки Co частично продиффундировал в пленку оловянного припоя. В то же время диффузии Sn в термоэлектрический материал не произошло. Концентрация Sn максимальная в пленке припоя. Олово в образце термоэлектрического материала отсутствует (рис. 4). Увеличение времени отжига не влияло на барьерные свойства контакта, барьерный слой W–Co блокировал проникновение Sn в термоэлектрический материал. В связи с этим в области контакта при повышенных температурах

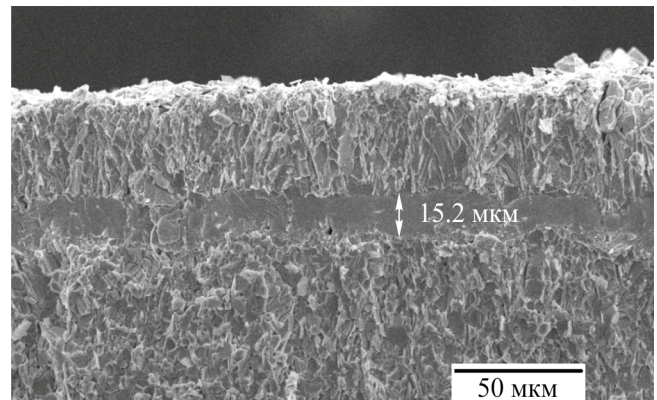


Рис. 3. Изображение скола образца $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ с нанесенной контактной системой W–Co/Sn после отжига при 600 К.

параметры термоэлектрического материала не изменялись.

Барьерные свойства пленок W–Co, сформированных на образцах GeTe (рис. 4), исследовали после отжига образцов при 900 К в течение 5 ч. Отжиг не повлиял на барьерные свойства контакта, т. е. взаимной диффузии компонентов материала контактной системы W–Co/Sn в образец GeTe и компонентов

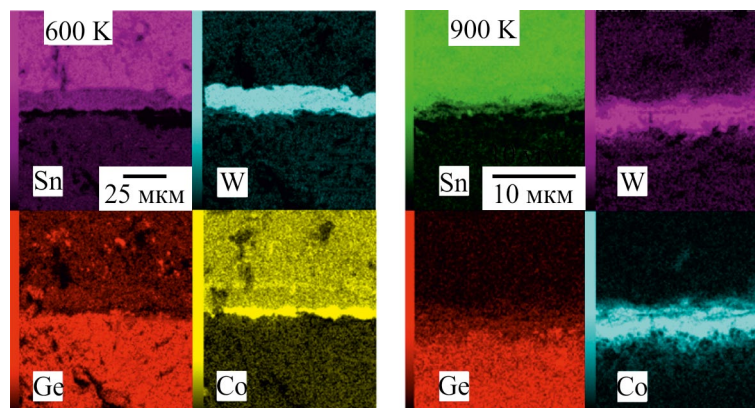


Рис. 4. Поэлементное картирование скола образцов $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ и GeTe со сформированной контактной системой W–Co/Sn после отжига при 600 и 900 К.

Таблица 3

Значения адгезионной прочности пленок W–Co, сформированных на образцах термоэлектрических материалов $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$, GeTe, PbTe

Состав раствора для декапирования поверхности образцов	Адгезионная прочность, МПа		
	$\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$	GeTe	PbTe
20% HNO_3	10.78	1.05	5.43
30% NaOH	2.43	13.35	1.78
30% CH_3COOH	9.33	2.57	12.49

термоэлектрического материала в контактную систему не наблюдали, что подтверждается энергодисперсионным анализом. Таким образом, можно утверждать, что сформированные пленки W–Co выполняли функции диффузионных барьеров при температурах до 600 К в контактах, сформированных на образцах $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$, до 900 К в контактах на образцах GeTe.

Пленки W–Co формировали на образцах термоэлектрических материалов, поверхность которых декапировали в различных растворах. Для каждого термоэлектрического материала установлен состав растворов, при декапировании которым получены максимальные значения адгезионной прочности пленок W–Co (табл. 3). Адгезионная прочность пленок W–Co не изменялась после термообработки.

Удельное сопротивление пленок W–Co составляло $(3.3\text{--}3.5) \cdot 10^{-7}$ Ом·м, удельное контактное сопротивление не превышало $3.8 \cdot 10^{-9}$ Ом·м² для всех пленок, сформированных на образцах термоэлектрических материалов $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$, GeTe, PbTe.

Выводы

Установлены условия, при которых могут быть получены равномерные по толщине пленки W–Ni и W–Co на образцах термоэлектрических материалов на основе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$, GeTe и PbTe. Пленки W–Co после термического воздействия обладают барьерными свойствами, т. е. предотвращают взаимную диффузию компонентов материалов контактных систем в образцы термоэлектрических материалов и компонентов термоэлектрического материала в контактные системы, имеют низкие значения удельного сопротивления и удельного контактного сопротивления, а также высокую адгезионную прочность, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контактам в структуре термоэлементов. Сформированные контакты могут быть использованы в термоэлементах с рабочими температурами до 900 К.

Перспективой дальнейших исследований является увеличение содержания W в контактных пленках, что

может привести к увеличению их барьерных свойств и позволит использовать контакты в термоэлементах, изготовленных на основе SiGe, с рабочими температурами до 1200 К.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00494).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Е. П. Корчагин — определение режимов и составов раствора электролита, проведение процесса электрохимического осаждения пленок; Ю. И. Штерн — обоснование выбора материалов, используемых для изготовления контактов, определение диффузионно-барьерных свойств контактов; И. Н. Петухов — разработка способов подготовки поверхности образцов термоэлектрических материалов; Д. Г. Громов — энергодисперсионный анализ элементного состава пленок; М. Ю. Штерн — определение электрофизических параметров полученных пленок; М. С. Рогачев — измерение адгезионной прочности контактов; Р. М. Рязанов — исследование состава и морфологии поверхности пленок.

Информация об авторах

Корчагин Егор Павлович

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-0608>

Штерн Юрий Исаакович, д.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3882-389X>

Петухов Иван Николаевич

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2905-4649>

Громов Дмитрий Геннадьевич, д.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4563-9831>

Штерн Максим Юрьевич, д.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-2393>

Рогачев Максим Сергеевич, к.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5108-0555>

Рязанов Роман Михайлович

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2464-8712>

Список литературы

- [1] Wu D., Feng D., Xu X., He M., Xu J., He J. Realizing high figure of merit plateau in $\text{Ge}_{1-x}\text{Bi}_x\text{Te}$ via enhanced Bi solution and Ge precipitation // *J. Alloys Compd.* 2019. V. 805. P 831–839.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.120>
- [2] Lee K. H., Shin W. H., Kim H.-S., Lee K., Roh J. W., Yoo J., Kim J.-I., Kim S. W., Kim S.-I. Synergetic effect of grain size reduction on electronic and thermal transport properties by selectively-suppressed minority carrier mobility and enhanced boundary scattering in $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ alloys // *Scr. Mater.* 2019. V. 160. N 15. P. 1519.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.038>
- [3] Vishwakarma A., Chauhan N. S., Bhardwaj R., Johari K. K., Dhakate S. R., Gahtori B., Bathula S. Melt-spun SiGe nano-alloys: Microstructural engineering towards high thermoelectric efficiency // *J. Electron. Mater.* 2021. V. 50. P. 364–374.
<https://doi.org/10.1007/s11664-020-08560-6>
- [4] Yang Z., Wang S., Sun Y., Xiao Y., Zhao L.-D. Enhancing thermoelectric performance of n-type PbTe through separately optimizing phonon and charge transport properties // *J. Alloys Compd.* 2020. V. 828. ID 154377.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154377>
- [5] Shtern M. Yu. Nanostructured thermoelectric materials for temperatures of 200–1200 K obtained by spark plasma sintering // *Semiconductors.* 2023. V. 56. N 13. P. 437–443.
<https://doi.org/10.1134/S1063782622130152>
- [6] Yu Y., Xu X., Bosman M., Nielsch K., He J. Germanium-telluride-based thermoelectrics // *Nat. Rev. Electr. Eng.* 2024. <https://doi.org/10.1038/s44287-023-00013-6>
- [7] Shtern M., Rogachev M., Shtern Y., Gromov D., Kozlov A., Karavaev I. Thin-film contact systems for thermocouples operating in a wide temperature range // *J. Alloys Compd.* 2021. V. 852. ID 156889.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156889>
- [8] Zhu X., Cao L., Zhu W., Deng Y. Enhanced interfacial adhesion and thermal stability in bismuth telluride/nickel/copper multilayer films with low electrical contact resistance // *Adv. Mater. Interfaces.* 2018. V. 5. ID 1801279. <https://doi.org/10.1002/admi.201801279>
- [9] Korchagin E., Shtern M., Petukhov I., Shtern Y., Rogachev M., Kozlov A., Mustafiev B. Contacts to thermoelectric materials obtained by chemical and electrochemical deposition of Ni and Co // *J. Electron. Mater.* 2022. V. 51. P. 5744–5758.
<https://doi.org/10.1007/s11664-022-09860-9>
- [10] Фуалков Ю. Я., Грищенко В. Ф. Электровыделение металлов из неводных растворов. Киев: Наук. думка, 1985. С. 95–97.
- [11] Asgari M., Ghasem B., Monirvaghefi M. Electroless deposition of Ni–W–Mo–Co–P films as a binder-free, efficient and durable electrode for electrochemical hydrogen evolution // *Electrochim. Acta.* 2023. V. 446. ID 142001.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142001>
- [12] Zoui M. A., Bentouba S., Stocholm J. G., Bourouis M. A review on thermoelectric generators: Progress and applications // *Energies.* 2020. V. 13. N 3606. P. 1–32.
<https://doi.org/10.3390/en13143606>
- [13] Штерн М. Ю., Караваев И. С., Рогачев М. С., Штерн Ю. И., Мустафоев Б. Р., Корчагин Е. П., Козлов А. О. Методики исследования электрического контактного сопротивления в структуре металлическая пленка–полупроводник // *Физика и техника полупроводников.* 2022. Т. 56. № 1. С. 1097–1104.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2021.12.51689.01>